



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Mihkel Leht

KOMMUTATSIOONIPROTSESSI ANALÜÜS
COMMUTATION PROCESS ANALYSIS IN ELECTRICAL
SWITCHING GEAR

Bakalaureusetöö
Tehnika ja Tehnoloogia õppekava

Juhendajad: lektor Erkki Jõgi, *MSc*
nooremteadur Siim Muiste, *MSc*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Mihkel Leht		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Kommutatsiooniprotsessi analüüs			
Lehekülgi: 40	Jooniseid: 37	Tabeleid: 1	Lisasid: 0
<p>Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika, 4.17.</p> <p>Energeetikaalased uuringud; T140 Energeetika.</p> <p>Juhendaja(d): lektor Erkki Jõgi, <i>MSc</i>; nimetatud nooremteadur Siim Muiste, <i>MSc</i></p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool, 2021</p>			
<p>Bakalaureusetöö eesmärgiks on analüüsida kommutatsiooniprotsessi elektrilistes kaitse- ja juhtimisaparaatides ning näidata katselisel meetodil aparaatide sees toimuvaid protsesse ning mis oleks õppematerjaliks inseneeria-ala üliõpilastele, kellel on elektrotehnika üldainena. Lõputöö aktuaalsus seisneb eelkõige õigete kaitse- ja juhtimisaparaatide valikul, tagamaks elektriohutus. Bakalaureusetöö teoreetilises osas antakse ülevaade mini-kaitselülitite, releede ja kontaktorite otstarbest, ehitusest ja tööpõhimõttest. Töö praktilises osas uuritakse esmalt mini-kaitselülitite kommutatsiooniprotsessi. Selleks tekitatakse katsestendil kaitseaparaadile suur ülekoormus, katsed jäädvustatakse kaameraga ning luuakse hiljem analüüs teoreetiliste printsiipidega. Teises praktilises osas uuritakse releede ja kontaktorite kommutatsiooniprotsessi. Selleks luuakse lülitus, kus relee ja kontaktor lülitab kahte erinevat elektritarbijat. Protsess jäädvustatakse sarnaselt esimesele praktilisele osale kaameraga, mida seejärel võrreldakse teoreetiliste printsiipidega. Katsete analüüsist selgub, et kommutatsiooniprotsess kaitse- ja juhtumisaparaatides toimub vastavalt teoreetilistele väidetele.</p>			
Märksõnad: mini-kaitselüliti, relee, kontaktor, elektriikaar, kuumenemine			

Eesti Maaülikool		Abstract of Bachelor's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Mihkel Leht		Curriculum: Engineering	
Pealkiri: Commutation Process Analysis in Electrical Switching Gear			
Pages: 40	Figures: 37	Tables: 1	Appendixes: 0
Department / Chair: Chair of Energy Engineering			
Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering; 4.17. Energetic Research; T140 Energy research			
Supervisors: Erkki Jõgi, <i>MSc</i> ; Siim Muiste, <i>MSc</i>			
Place and date: Tartu 2021			
<p>The aim of this bachelor's thesis is to analyze commutation process in electrical switching gear using experimental methods and to be study material for engineering curriculum students who learn electrical engineering as a general subject. The topicality of the research lies in choosing the correct switching gear and ensuring electrical safety. In the theoretical part of the bachelor's thesis the author gives full overview of miniature circuit breakers, relays and contactors construction, functionality and purpose of use. In the first practical part of the thesis miniature circuit breaker commutation process is examined. In order of examining them several high load experiments were run on circuit breakers on the test stand, while capturing the process with cameras and to later compare the test results with theoretical commutation process principles. In the second practical part of the work commutation process of relays and contactors are examined. In order of examining them the relay and contactor were connected to switch two different types of electrical loads. All the tests were captured by camera and results were later analyzed with theoretical principles. The analysis of the tests show that the commutation process in electrical switching gear are mostly according to the theoretical principles.</p>			
Keywords: miniature circuit breaker, relay, contactor, electric arc, thermal damage			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. KAITSEAPARAADID	7
1.1. Kaitselülitite otstarve	7
1.2. Kaitselülitite ehitus ja tööpõhimõte	7
1.3. Kaitselülitite karakteristikud ja tunnusjooned	10
2. LÜLITUS- JA JUHTIMISAPARAADID	14
2.1. Releede otstarve	14
2.2. Elektromagnetilise relee ehitus ja tööpõhimõte	14
2.3. Elektromagnetilise relee kontaktide ja mähise tüübid	16
2.4. Kontaktorid	19
3. KOMMUTATSIOONIPROTSESSI ANALÜÜS	21
3.1. Kommutatsiooniprotsess kaitselülitites	21
3.1.1. Katsemetoodika	22
3.1.2. Katse tulemused ja analüüs	24
3.2. Kommutatsiooniprotsess juhtimisaparaatides	28
3.2.1. Katsemetoodika	28
3.2.2. Katse tulemused ja analüüs	33
KOKKUVÕTE	36
KASUTATUD KIRJANDUS	38

SISSEJUHATUS

Tehnika kiire arengukäiguga on vältimatult suurenenud nõudlus elektriseadmete automatiseerimise järele, nii tööstussektoris kui tavamajapidamises. Veel mõnikümmend aastat tagasi kodude elektrikiplides leiduv sulavkaitse on nüüdseks pigem harv nähtus. Automaatkaitsselülite kasutusele võtmine on olnud mõneti revolutsiooniline ning uute hoonete ehitusel on need esmaseks kaitseaparaadi valikuks elektriahelates. Sarnaselt kaitsselülite laialdasele kasutamisele, on suurenenud vajadus elektritarbijaid juhtida distantsilt, mille teostamiseks on üheks võimalikuks lahenduseks kasutada elektriahelates kontaktoreid ja releesid.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on analüüsida kommutatsiooniprotsessi elektrilistes kaitse- ja juhtimisaparaatides ning näidata katselisel meetodil aparaatide sees toimuvaid protsesse, mis oleks õppematerjaliks inseneeria-ala üliõpilastele, kellel on elektrotehnika üldainena, teadvustamaks elektriaparaatide valikut ning elektriohutust.

Lõputöö on jaotatud kolme peatükki. Esimeses peatükis käsitletakse põhjalikult mini-kaitsselülite ehitust ja tööpõhimõtet, andes ülevaate kaitsselülites leiduvatest komponentidest, karakteristikulistest erinevustest ja nende valikust.

Teises sisupeatükis vaadeldakse lähemalt releesid ja kontaktoreid. Teise osa esimeses alapeatükis kirjeldatakse elektromagnetiliste releede ehitust ja komponente ning näidatakse skemaatiliselt erinevate releede lülituspõhimõtteid juhtimisahelates ning selgitatakse nende valikut. Teises alapeatükis antakse ülevaade kontaktoritest, kirjeldades nende ehitust ja tööpõhimõtet, mida jälgida kontaktorite valikul ja kuidas neid rakendada. Lisaks tuuakse välja põhiline erinevus releede ja kontaktorite vahel.

Kolmas peatükk kirjeldab esmalt kommutatsiooniprotsessi teoreetilisi printsiipe ning seejärel sooritakse kommutatsiooniprotsessi uurivad katsed ja võrreldakse neid teoreetiliste alustega. Esimese praktilise osana uuritakse kaitsselüliti kommutatsiooniprotsessi, selleks viiakse Eesti Maaülikooli Tehnikamaja elektrimasinate laboris läbi katse, kus Hageri B16 kaitsselülitile

tekitakse katsestendil suur ülekoormus, et analüüsida kaitse rakendumisel tekkivat kommutatsiooni. Katsed jäädvustati kaameraga, mida hiljem kasutada analüüsimaterjalina, võrdlemaks katsetulemusi teoreetiliste printsiipidega. Lõputöö teises praktilises osas uuritakse juhtimisaparaatide kommutatsiooniprotsesse. Selleks viiakse Eletal Service OÜ töökojas läbi kahe erineva koormuse lülituskatsed, mis sarnaselt esimesele praktilisele katseosale, jäädvustatakse kaameraga, et neid hiljem teoreetiliste kommutatsiooniprotsessi põhimõtetega võrrelda ja analüüsida, mille lõpuks antakse hinnang katseliste ja teoreetiliste aluste vahelisele kehtivusele.

Autor soovib eraldi tänu avaldada juhendajatele ja Eletal Service OÜ'le, kes tagasid vajalikud materjalid lõputöö katsete sooritamisteks.

1. KAITSEAPARAADID

1.1. Kaitselülitite otstarve

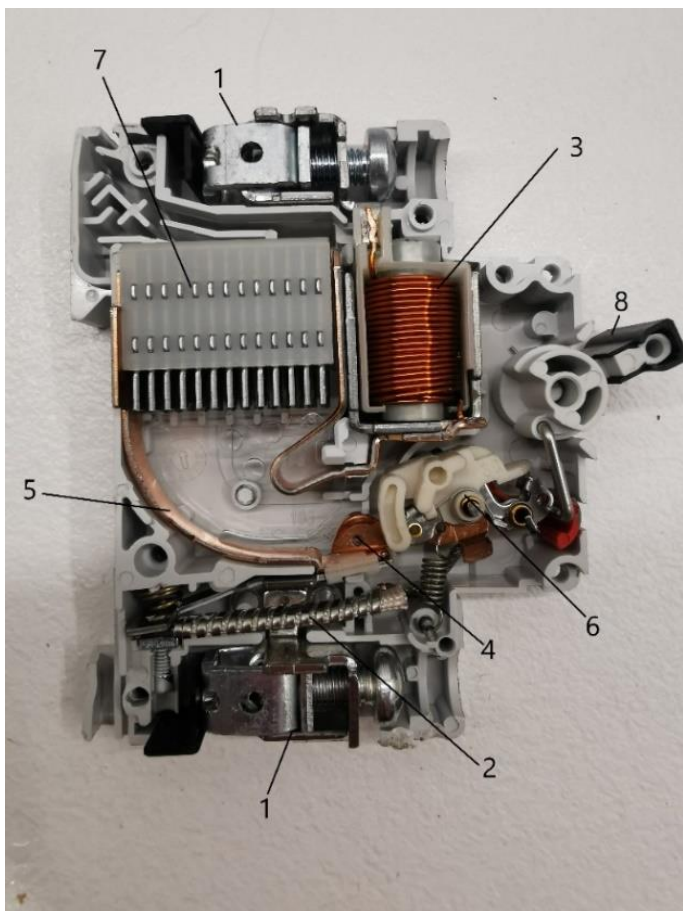
Üha enam on tänapäeval raskem leida majapidamist, millel elektrikilbis ei kasutata elektriahelate kaitseks kaitselüliteid. Vastavalt madalpingeliste elektripaigaldiste standardile, peab olema toite automaatseks väljalülitamiseks elektriahelate alguses kaitselüliti, tagamaks kaitset elektrilöögi eest [1].

Lisaks elektrilöögi eest kaitsele, peab olema tagatud ka elektrijuhistike enda kaitse. Kaablite ja juhtmete eluea peamiseks vähendatavateks teguriteks on temperatuur ja väliskeskkond. Kestvalt lubatud koormusel tuleb jälgida kaablite paigaldusviisi, sest juhistiku soojenemisel tema isolatsiooni omadused halvenevad, mille tõttu on elektrisüsteem haavatavam ülekoormusele ja lühistele. Et vältida selliseid olukordi, peab olema vooluringi paigaldatud kaitselüliti. [2]

Kaitselülitite eelisteks veidi aeguvatele sulavkaitsmetele tavalistes majapidamises peitub nende kasutamise lihtsuses. Kaitselüliti on käsitlemisel ohutum, kuna elektriahela rikke ilmnemisel piisab enamasti kaitselüliti taaslülitusest (sulavkaitsmetel tuleb enamasti vahetada sular), seejuures ahela rikke või avarii ilmnemisel on silmaga hästi tuvastav, millise kaitselülitiga on probleem. Tänapäeva kaitselülitid on pika elueaga - kuni 20000 lülitust. [3]

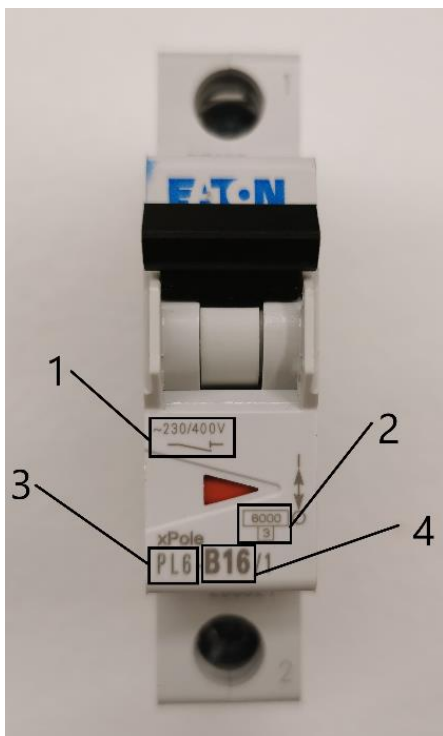
1.2. Kaitselülitite ehitus ja tööpõhimõte

Oma parameetritelt peavad majapidamises kasutatavad kaitselülitid vastama EVS-EN 60898 standardile. Enim levinumad ja majapidamistes kasutatavad kaitselülitid on mini-kaitselülitid (*miniature circuit breaker* e *MCB*), mis on oma ehituselt lihtsad ja väga kompaktsed. Joonisel 1.1 on näha kaitselüliti ristlõiget, kus on väljatoodud ka põhikomponendid [3, 4]:



Joonis 1.1. Kaitselüliti ristlõige: 1 – ühendusklemmid; 2 – termovabasti; 3 – elektromagnet vabasti; 4 – liikuv kontakt; 5 – kaare venitaja; 6 – lülitusmehhanism; 7 – kaarekustutus kamer; 8 – lülitushoob.

Kaitselülitite komponentide paigutus korpuses võib erineda erinevatel tootjatel, kuid komponentide enda põhimõte jääb samaks. Korpus on konstrueeritud tugevast isoleermaterjalist, mis hoiab paigal ja kaitseb sisekomponente väliskeskkonna tegurite eest. Lisaks kaitseb korpus inimest pinge all olevate osade eest, et tagada elektriohutus. Korpuse esipaneelil on kirjas vastava kaitselüliti nimiaandmed, mis on väljatoodud joonisel 1.2 [3]:



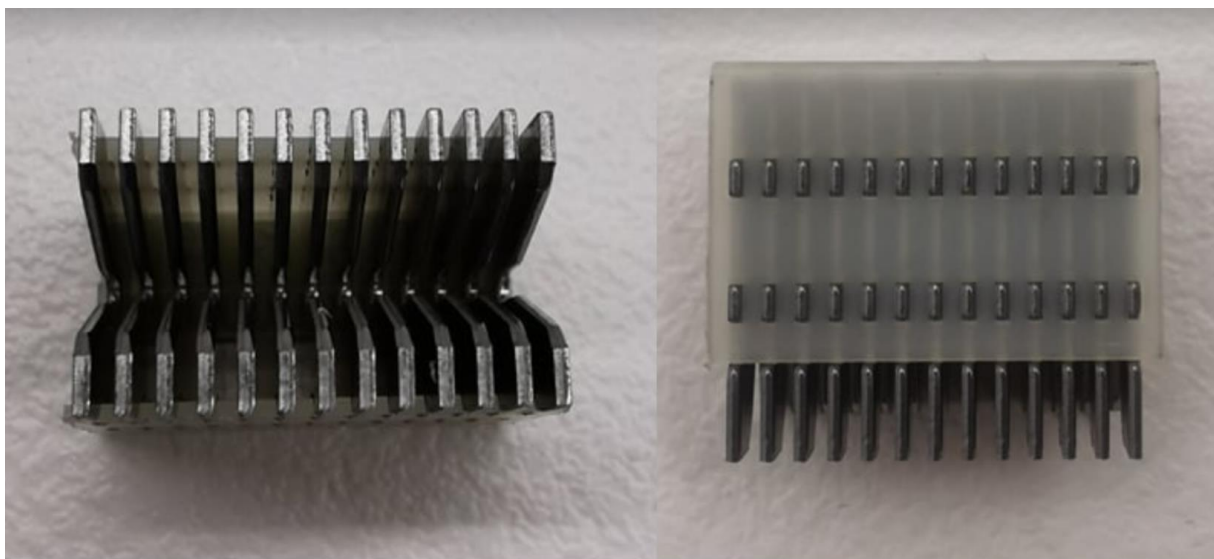
Joonis 1.2. Kaitselüliti nimiaandmed: 1 – tööpinge; 2 – lahutusvõime; 3 – seerianumber; 4 – kaitselüliti karakteristik.

Kaitselüliti on töörežiimis, kui lülitushoob on ülemises asendis. Kui lülitushoob on sisse lükatud, edastab see jõu lülitusmehhanismile. See omakorda ühendab ja fikseerib liikuva ja paigal oleva kontakti, tekitades ühenduse sisend- ja väljundklemmi vahel. [3]

Elektromagnetiline vabasti (joonis 1.1 pos 3) on sisuliselt südamikuga mähis, mis on jadamisi ühendatud kaitselüliti vooluahelaga. Tänu oma kiiretoimelisusele, kasutatakse elektromagnetilist vabastit lühise kaitseks. Lühise korral on vool hetkeliselt väga suur, tekitades mähises tugeva elektromagnetvälja, mis surub vabastusmehhanismi avatud asendisse. Rakendumiskiirust saab muuta mähise keerdude arvuga. [3]

Kuna elektromagnetiline vabasti reageerib kiiresti voolu järsule suurenemisele (lühise ja suure voolutõukega tarbija sisselülitamisel), siis kasutatakse kaitselüliti ahelas ka termovabastit (joonis 1.1 pos 2). Termovabasti on bimetall, mille ülesanneteks on reageerida kestva ülekoormusele ning tekitada viide elektromagnetilisele vabastile voolu järsu suurenemise korral. Kui vool on kestva üle kaitselüliti nimiamperaaži, hakkab bimetall painduma, tõmmates sellega enda poole lülitusmehhanismi ning kaitselüliti lülitub välja. Kuna väljalülitatud asend

on kaitselüliti algasend, siis väljalülitumise protsessi lõpus taastab ka bimetall oma algse kuju. Termovabasti hoiab küll ära kaitselüliti rakendumise voolu järsul kasvul, kuid ilma elektromagnetilise vabastita ahelas on see ka tema suureks miinuseks, sest bimetalli madal termiline vastupidavus lubab väikest lühise taluvust, mis mõjutab kaitselüliti selektiivsust. Voolu suurenedes suureneb ka kaitselüliti rakendumiseks vajalik jõud, mida peab suutma termovabasti ületada. [3]



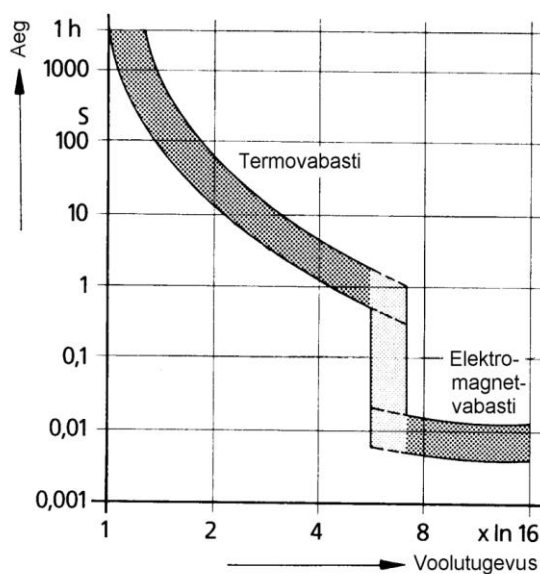
Joonis 1.3. Kaarekustutusvõre pealtvaade (vasakul) ja külgvaade (paremal).

Kaitselüliti igasugusel lülitamisel (mehaaniline, lühis, ülekoormus), tekib kontaktide vahele sädelus või leek, mida kutsutakse elektrikaareks. Selle kustutamiseks on kaitselülitis kaarekustutus kamber (joonis 1.1, joonis 1.3). Elektrikaare tekkimisel liigub kaarlahendus mööda kaare venitajat (joonis 1.1 pos 5) terasplaatidest koosnevasse võresse, kus leek hakitakse ning kustub. Ühtlasi määrab kaarekustuti ära kaitselüliti piirlahutusvõime. [3]

1.3. Kaitselülitite karakteristikud ja tunnusjooned

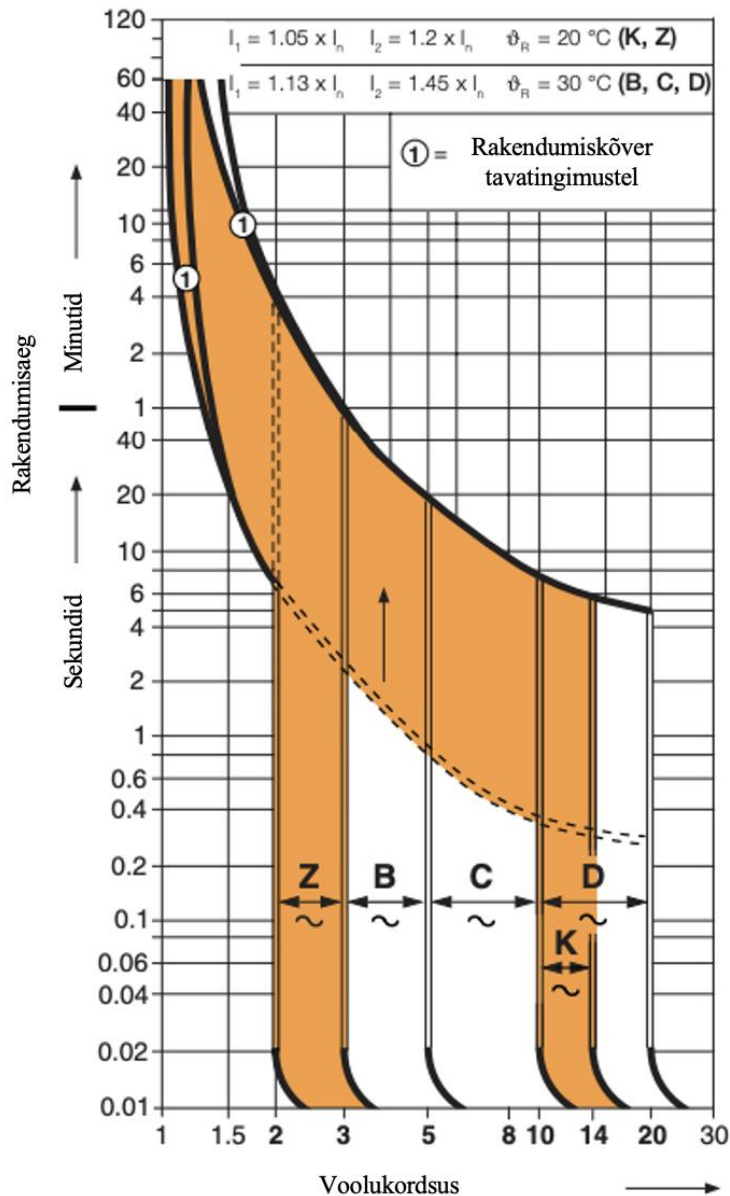
Kaitselüliti valimisel peab eelnevalt kindlaks tegema, millised saavad olema tarbijad selles ahelas, mille ette antud kaitselüliti on paigutatud. Selle valiku tegemisel on igal kaitselüliti esipaneelil tema nimiaandmed (joonis 1.2). Tavamajapidamises kasutatavad mini-kaitselülitid on nimipingega 230/400V, voolutugevusega 0,5 A kuni 63 A ja nimilahutusvõimega 4,5 – 10 kA.

Täht koos numbriga (joonisel 1.2 pos 4) näitab kaitselüliti amperaazi ja karakteristikut ning selle rakendumistunnusjoont. [3, 5]



Joonis 1.4. Kaitselüliti põhimõtteline rakendumistunnusjoon. [5]

Vaadates joonist 1.4, on näha, et kaitselüliti rakendustunnusjoon näitab kahe vabasti rakendumist kindla rakendumisaja jooksul, teatud voolukordsuse juures. Turul levinumad mini-kaitselülite rakendustunnusjooned on: Z, B, C, K, D (joonis 1.5). Kuna iga rakendustunnusjoon on erinev, siis sobivad nad kaitsma ka erinevaid tarbijaid, näiteks Z karakteristikuga kaitselüliti on kõige kiirema rakendumisajaga, seetõttu sobib ta kaitsma ahelaid, kus on väikeelektroonika seadmed. B tunnusjoonega kaitselüliteid kasutatakse laialdaselt valgustite ahelate kaitseks, C tunnusjoonega kaitselüliteid kasutatakse üldiselt tavapistikupesade ja väiksemate elektrimootorite kaitseks ning K ja D, tänu oma suurele rakendumisajale, on mõeldud põhiliselt ainult mootorite käivitamiseks. [3; 6]



Joonis 1.5. Kaitselülite rakendustunnusjooned. [6]

Kaitselülite vabastite seadesuurused esitatakse lisaks rakendustunnusjoone graafikule ka tabelina (tabel 1.1). Tabelist on näha, et B ja C karakteristik on kalibreeritud 30 °C keskkonna temperatuurile ning K ja Z on kalibreeritud 20 °C keskkonna temperatuurile. Lisaks tuleb märkida, et temperatuur mõjutab vaid termovabasti tööd. Elektromagnetilise vabasti rakendusajad on reguleeritud sagedusevahemikuga 50-60 Hz. [6]

Tabel 1.1. Kaitselülite vabastite seadesuurused [6]

Standardid	Kaitselüliti karakteristikud	Kaitselüliti suurus	Termovabasti ¹⁾			Elektromagnetiline vabasti ²⁾		
			Teimivool		Rakendus- aeg	Hoidevool		Rakendusaeg
			I ₁	I ₂				
IEC/EN 60898-1	B	6-63 A	1,13* I _n -	- 1,45* I _n	>1h <1h ³⁾	3* I _n -	- 5* I _n	0,1 ... 45s (I _n ≤32/A)/0,1 ... 90s (I _n >32 A) <0,1s
	C	0,5-63 A	1,13* I _n -	- 1,45* I _n	>1h <1h ³⁾	5* I _n -	- 10* I _n	0,1 ... 15 s (I _n ≤32/A)/0,1 ... 30s (I _n >32 A) <0,1 s
	D	0,5-63 A	1,13* I _n -	- 1,45* I _n	>1h <1h ³⁾	10* I _n -	- 20* I _n	0,1 ... 4 s (I _n ≤32/A)/0,1 ... 8 s (I _n >32 A) <0,1s
IEC/EN 60947-2	K	0,5-63 A	1,05* I _n -	- 1,2* I _n	>1h <1h ³⁾	10* I _n -	- 14* I _n	>0,2s <0,2s
	Z	0,5-63 A	1,05* I _n -	- 1,2* I _n	>1h <1h ³⁾	2* I _n -	- 3* I _n	>0,2s <0,2s

Märkused:

1)Termovabasti on kalibreeritud kaitselüliti ümbritseva keskkonna temperatuurile; B, C, D kontrollväärtus on 30 °C; K ja Z kontrollväärtus on 20 °C. Kõrgema ümbritseva temperatuuri korral voolutugevuse väärtused langevad umbes 6% 10 K temperatuuri tõusu kohta.

2) Antud rakendumisajad kehtivad ainult 50/60 Hz sageduse korral.

3) Alates töötemperatuurist (pärast I₁ >1 h)

2. LÜLITUS- JA JUHTIMISAPARAADID

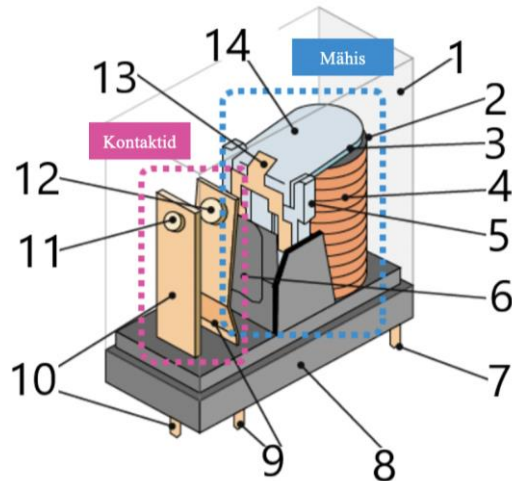
2.1. Releede otstarve

Juba aastakümneid on releed olnud põhilisteks juhtseadmeteks erinevates hooneautomaatika ja tööstusautomaatika elektrisüsteemides. Kõige lihtsamas mõttes võib releed käsitleda kui elektriliselt juhitavat lülitit. Releede kasutusotstarve peitub eelkõige selles, et väikese voolu abil saab juhtida palju suurema vooluga tarbijaid (näiteks valgustite juhtimine). Lisaks sellele on releed võrreldes paljude teiste juhtimisaparaatidega väga odavad. [7-8]

Levinumateks releedeks on tänapäeval elektromagnetilised ja pooljuhtreleed. Antud lõputöö käsitleb lähemalt elektromagnetilisi releesid, mida kirjeldatakse lähemalt järgnevates alapeatükkides.

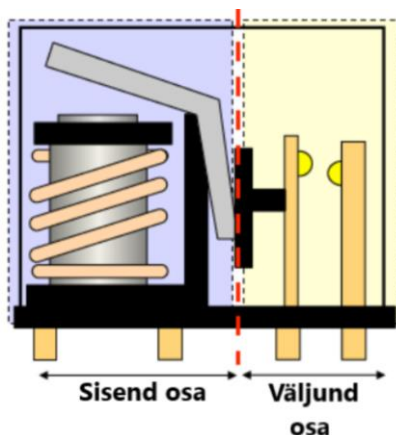
2.2. Elektromagnetilise relee ehitus ja tööpõhimõte

Elektromagnetiline relee on vanim ja kõige laiemalt levinum relee tüüp, mille komponentide põhimõtteline joonis on välja toodud joonisel 2.1. Elektromagnetilise relee põhikomponentideks on mähis, mähise südamik, ankur, vedru, liikuv klemm ja liikumatu klemm (joonis 2.1). [7]



Joonis 2.1. Elektromagnet rele põhimõtteline joonis: 1 – korpus; 2 – pool; 3 – südamik; 4 – mähis; 5 – ike; 6 – kartong; 7 – mähise klemm; 8 – rele põh; 9 – liikuv klemm; 10 – fikseeritud klemm; 11 – liikumatu kontakt, 12 – liikuv kontakt, 13 – hing koos vedruga; 14 – armatuur. [7]

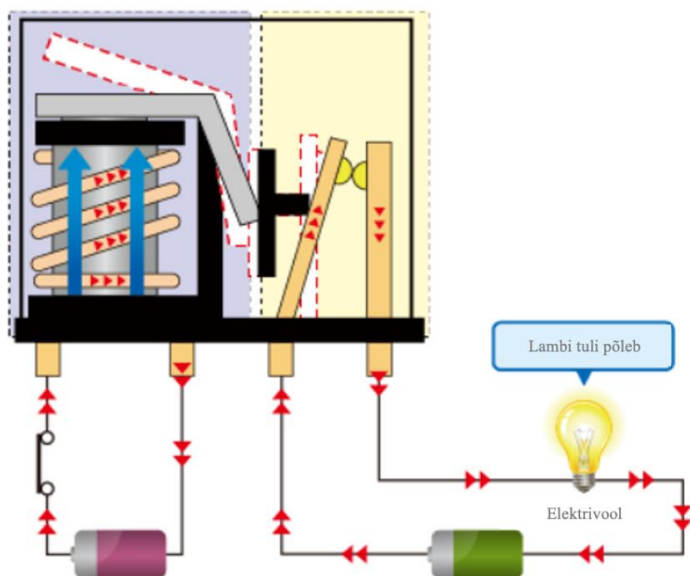
Kui rele mähise klemmidele rakendatakse pinget, tekitab see rele sisend osas elektromagnet välja, mis tõmbab ankru vastu pooli ja ankur koos vedruga omakorda lükkavad liikuva klemmi vastu liikumatut klemmi, tekitades sellega nende vahel lülituse. Selline lülitus on elektrilises mõttes väga kasutoov, sest kui rele sisend osa ja väljund osa on üksteisest eraldatud (joonis 2.2), ei ole nad ka voolutugevuselt omavahel seotud. [7-8]



Joonis 2.2. Elektromagnet rele sisend ja väljund osa. [7]

Joonisel 2.2 kujutatud eraldatud sisend ja väljund osaga releed, kus käivitavast nupust käib läbi ainult mähise vool, on eriti hea kasutada suurte tarbijate korral, kuna voolutugevused on omavahel eraldatud. Tarbija enda vool, millel võib olla hoopis teine toiteallikas, käib läbi

väljund osa. Kirjeldatud olukorda, kus on kasutatud eraldatud sisend ja väljund osaga releed, on kujutatud joonisel 2.3 [6]

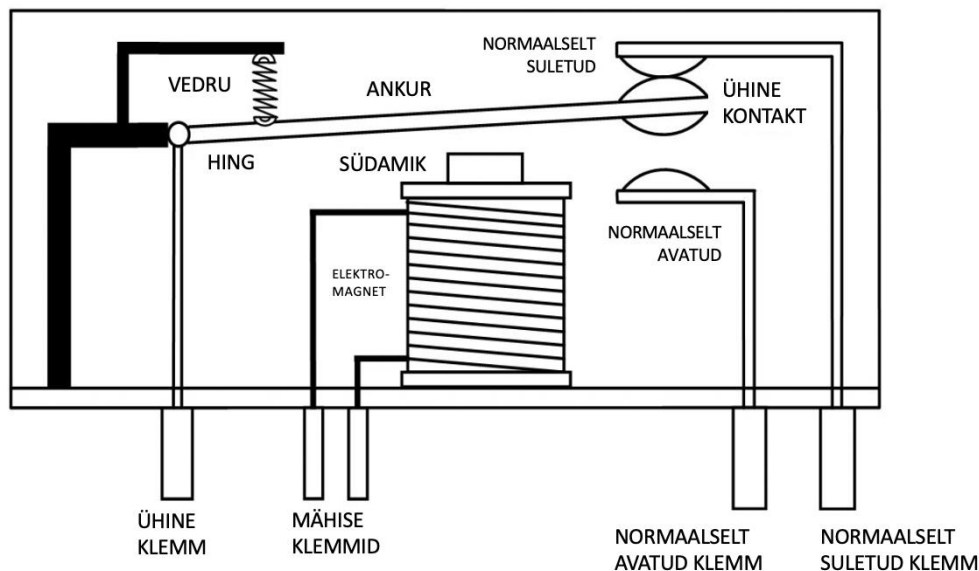


Joonis 2.3. Elektromagnet rele töörežiim. [7]

Jooniselt 2.3 on näha, et kui relee mähis rakendub, surub vedru liikuvat kontakti, mis tekitab ühenduse vooluallika ja tarbija vahel.

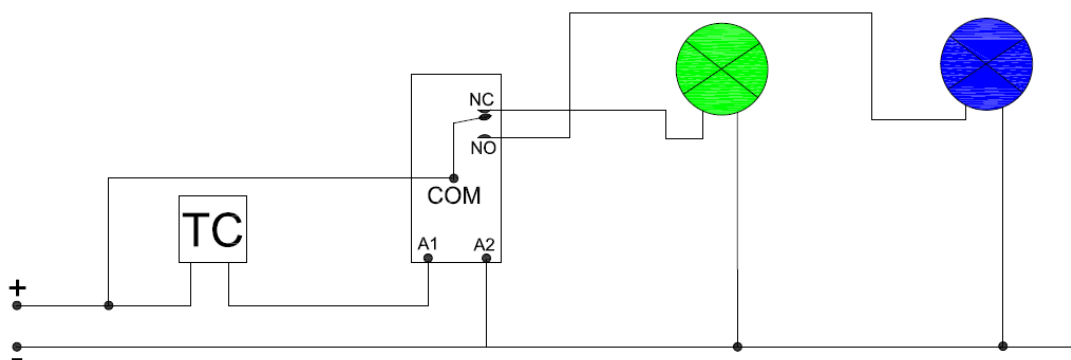
2.3. Elektromagnetilise rele kontaktide ja mähise tüübid

Seadmete juhtimisel on tihti nii, et signaali saamisel peab mingi seade jääma seisma ning mingi seade samal ajal käivituma. Sellise süsteemi rakendamiseks on üheks võimaluseks kasutada mitme lülituskontaktiga releed, mille väljundkontaktid on kas normaalolekus avatud (*NO*, ingl. *normally open*) või normaalolekus suletud (*NC*, ingl. *normally closed*) Sellist mitme lülituskontaktiga releed on kujutatud joonisel 2.4. [11]



Joonis 2.4. Mitme lülituskontaktiga relee. [10]

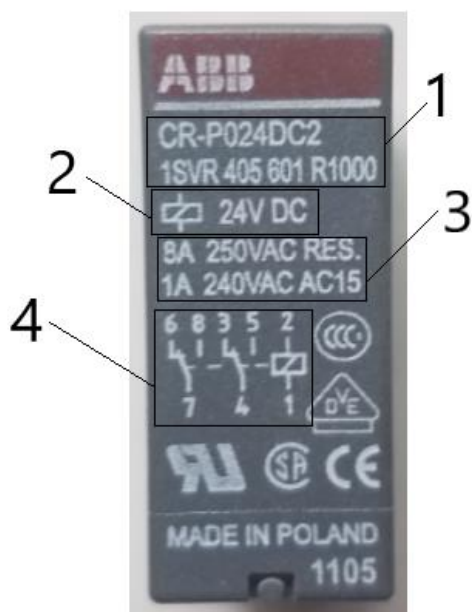
Joonisel 2.5 on kujutatud joonisel 2.4 relee põhimõtteline tööolukord, kus termostaadi -TC normaalolekus põleb roheline lamp ning seadistatud ruumitemperatuuri langemisel süttib sinine tuli. Termostaat juhib sisuliselt relee mähise kontakti (A1), mille rakendumisel lülitub relee lülituskontakt -COM (ingl. *common*) normaalselt suletud kontaktilt normaalselt avatud kontaktile, katkestades sellega vooluringi rohelse lambiga ning tekitades vooluringi sinisele lambiga.



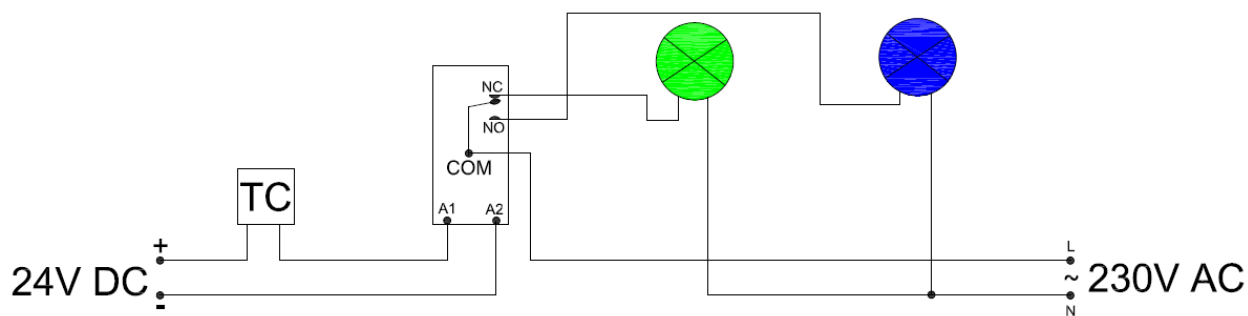
Joonis 2.5. Mitme lülituskontaktiga relee tööpõhimõte.

Tänapäeva releede valik ei ole lai mitte ainult lülituskontaktide, vaid ka mähise omaduste poolest. Joonisel 2.6 on näidatud relee nimiaandmed, millelt on näha, et antud relee mähise tööpingeks on 24 V alalispinge ning lülitusklemmidele võib rakendada kuni 250 V

vahelduvpinget. Voolutugevuse määrab ära relee kasutuskategooria, mis võib olla igal releel erinev. Vastavalt standardile IEC 60947-5-1 võib antud väljundklemmidele rakendada 8-amprilise voolutugevuse, kui tegemist on aktiivtakistusega, ning 1-amprilise koormuse elektromagnetilistes juhtimisahelates. [12, 15]



Joonis 2.6. Relee nimiaandmed. 1 – relee seeria; 2 – mähise pinge; 3 – kasutuskategooria ja voolutugevus; 4 – relee lülitusskeem. [13, 14]

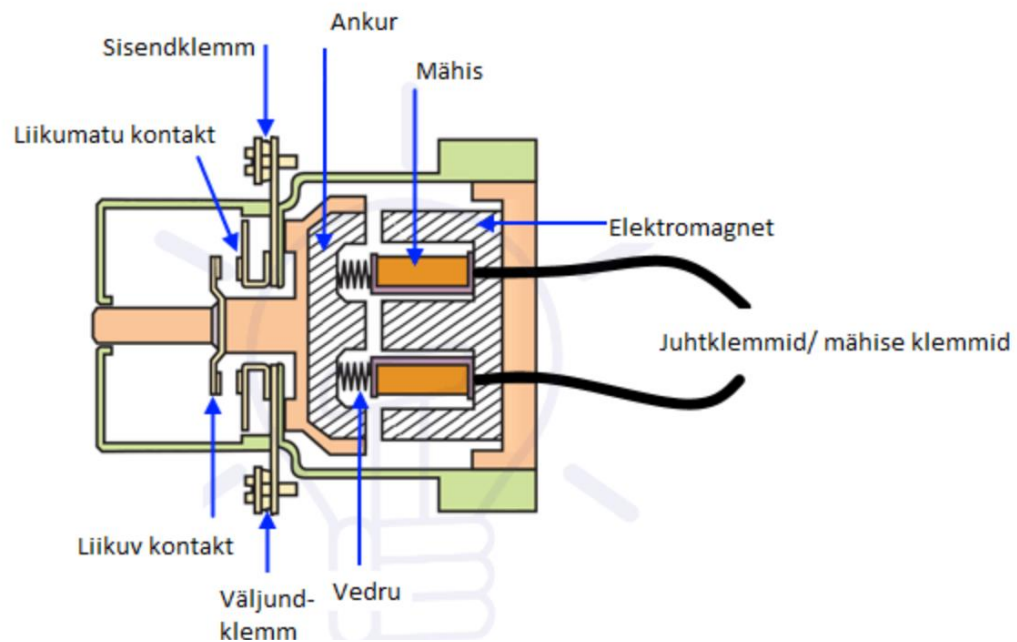


Joonis 2.7. Alalispinge mähisega relee tööpõhimõte.

Analoogselt joonisel 2.5 kujutatud lülitusskeemile, saab tekitada lülituse, kus ruumitermostaadi juhtpingeks on 24 V alalispinge ning lampe lülitavaks pingeks 230 V vahelduvpinge. Kirjeldatud olukorda on kujutatud joonisel 2.7.

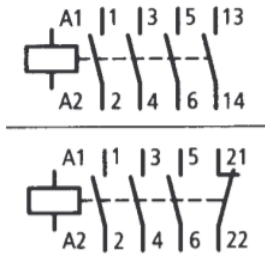
2.4. Kontaktorid

Kontaktor on lülitusaparaat, mida kasutatakse juhtimisahelates seadmete sagedaseks sisse- ja väljalülitamiseks. Sarnaselt releele ei kaitse kontaktor elektriahelat ülekoormuse ega lühise eest. Oma tööpõhimõttelt ja otstarbalt sarnaneb kontaktor releega – tal on sisend- ja väljundklemmid, mida juhitakse mähisega. Mähise pingestamisel tekitatakse elektromagnetväli, mille tulemusena sisend- ja väljundkontaktid sulguvad, tekitades vooluringi pingeallika ja tarbija vahel. Kontaktori tööpõhimõtet on kujutatud järgneval joonisel 2.8. [8]



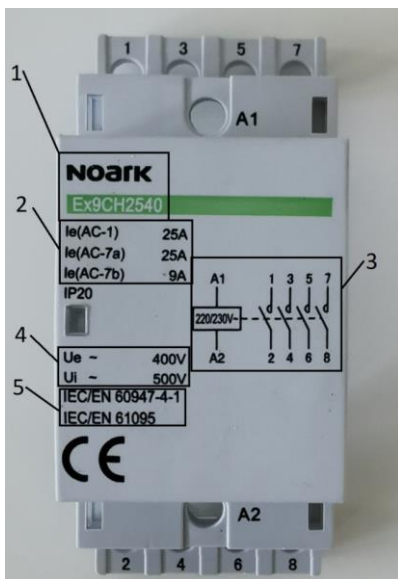
Joonis 2.8. Kontaktori tööpõhimõte. [16]

Kontaktori sisend- ja väljundkontaktid jagunevad kaheks – põhikontaktid ja abikontaktid. Joonisel 2.9 on näidatud neljapooluselise kontaktori tingmärk, kus põhikontakte tähistavad numbrid 1-6 ning abikontakte 13 ja 14. Kontaktor on konstrueeritud nii, et põhikontaktid peaksid vastu suurte koormuste lülitamisele ja abikontaktid on ette nähtud signaalide juhtimiseks. Abikontaktid on normaalolekus avatud või suletud. A1 ja A2 on mähise kontaktid. [17]



Joonis 2.9. Neljapooluselise kontaktori tingmärk avatud abikontaktiga (ülal) ja suletud abikontaktiga (all). [17]

Joonisel 2.10 on väljatoodud tüüpilise neljapooluselise ja avatud abikontaktiga moodulkontaktori nimiandmed, mille järgi saab otsustada milliste tarbijate lülitamiseks see kontaktor sobib. Lähtudes kasutuskategooriast, siis standardi EVS-EN IEC 60947-4-1:2019 kohaselt sobib see lülitama kuni 25 amprise voolutugevusega väikese induktiivsusega tarbijaid ning kuni 9 amprise voolutugevusega majapidamises kasutatavate mootorite lülitamiseks. [18]



Joonis 2.10. Moodulkontaktori esipaneel nimiandmetega. 1 – tootja ja seerianumber; 2 – kasutuskategooriad; 3 – lülitusskeem; 4 – klemmi (U_e) – ja isolatsioonipinge (U_i); 5 – toote vastavusstandardid.

Kontaktorite ja releede põhiliseks erinevuseks on lülitusotstarve. Üldiselt juhitakse releega kas juhtahelaid või väiksemaid tarbijaid, kuid kontaktoriga on võimalik lülitada väga suure voolutugevusega tarbijaid (osade kontaktorite puhul kuni 2850 amprit). [17; 19]

3. KOMMUTATSIOONIPROTSESSI ANALÜÜS

3.1. Kommutatsiooniprotsess kaitselülites

Kaitselülite kommutatsiooniprotsess jaotatakse kolme osasse: kontaktide sulgumine, töö suletud kontaktidega ja kontaktide lahutamine. [20]

Kaitselüliti sulgumisel kontaktid kuluvad mehaaniliselt, mille tagajärjeks võib olla elektrikaar, mis omakorda kulutab kaitselüliti elektriliselt. Mida suurem on vool, mis läbib vooluringi, seda suurem on kaitselüliti kontaktide elektriline kulumine. [3]

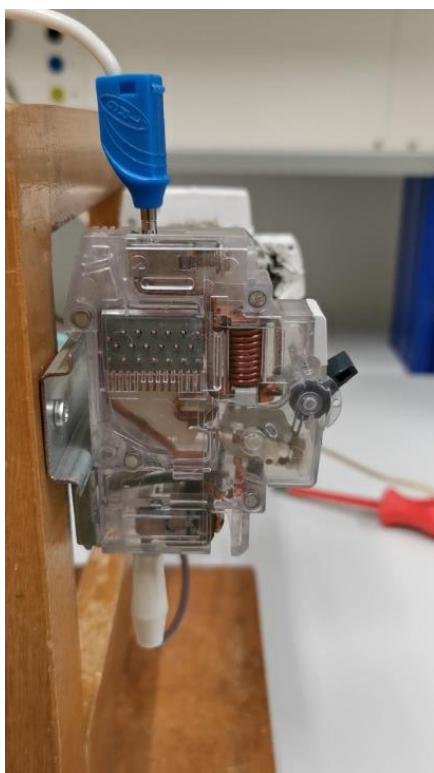
Suletud kontaktide töö saab toimuda vaid kaitselüliti normaaltalitusel, kui kaitselüliti kontaktid ja sisselülitusmehhanism on töökorras. Lühise ja ülekoormuse korral võib minna vooluahela temperatuur kaitselülitis nii suureks, et kui elektromagnetiline või termovabasti ei rakendu, võivad kaitselüliti kontaktid kokku keevituda, muutes aparaadi kasutuskõlbmatuks. [3]

Kommutatsiooniprotsessi raskeimaks osaks on kontaktide lahutamine, mis üldiselt toimub lühise, ülekoormuse või mõne muu rikke tõttu. Selle protsessi käigus kuumenevad kontaktid suurte voolude tõttu, mis lahutusel võivad tekitada kaarleegi. Kaarleegi kustutamiseks on kaitselülititesse konstrueeritud kaarekustutuskamber, mille ehitusest ja otstarbest räägiti lähemalt alapeatükis 1.2. Kommutatsiooniprotsessi lõppedes on vool elektrialahelast katkenud ja kontaktide vahe lülitis on saavutanud suurima piirväärtuse. [20]

Kommutatsiooniprotsessi osadest järeldub, et protsessi saab analüüsida selle käigus tekkivate nähtuste põhjal, millest olulisemad on: elektrodünaamilised jõud, soojenemine ja kuumenemine ning elektrikaar. [3]

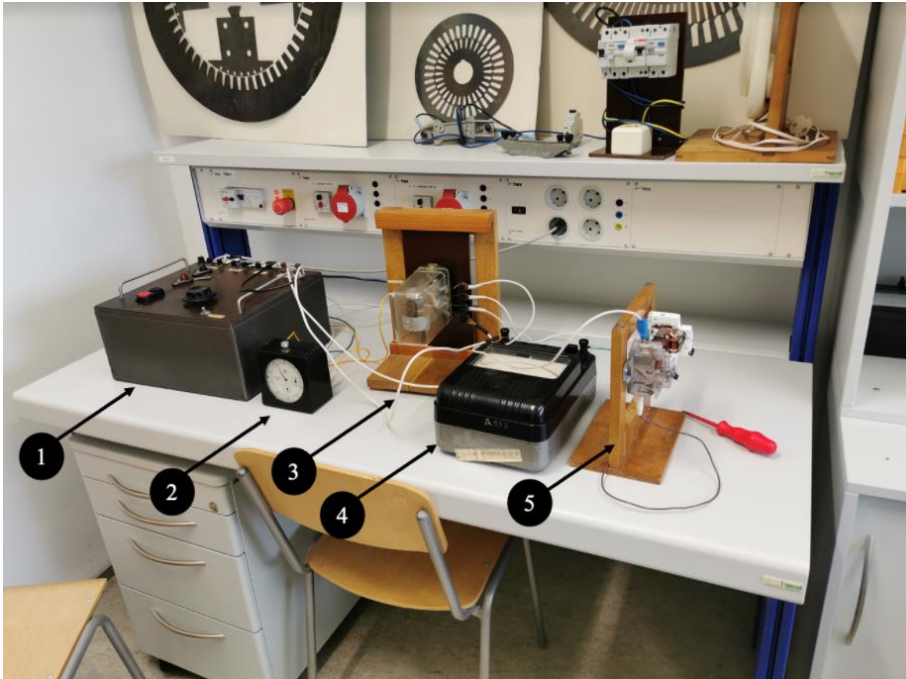
3.1.1. Katsetoodika

Kaitselülitite kommutatsiooniprotsessi analüüsimiseks viidi esmalt läbi katsed Eesti Maaülikooli Tehnikamajas elektrimasinate laboris. Katseobjektiks valiti Eesti Maaülikoolile kuuluv Hager B16 karakteristikuga kaitselüliti, mida on kujutatud joonisel 3.1. Antud kaitselüliti sobis katsete läbiviimiseks väga hästi oma läbipaistva korpuse tõttu.



Joonis 3.1. Hager B16 kaitselüliti.

Katse eesmärgiks oli rakendada suur ülekoormus kaitselülitile ning visuaalselt analüüsida tekkivaid kommutatsiooniprotsesside faase. Selleks koostati esmalt katsestend (joonis 3.2), mis koosnes koormust tekitavast autotrafost, stopperist (katselisel eesmärgil ei kasutatud, kuna aja fikseerimine ei olnud uuritava katse osa), ampermeetrist ning volureleest.



Joonis 3.2. Kaitselüliti uurimise katsestend. 1 – koormusseade; 2 – stopper; 3 – voolurelee; 4 – ampermeeter; 5 – kaitselüliti koos alusega.

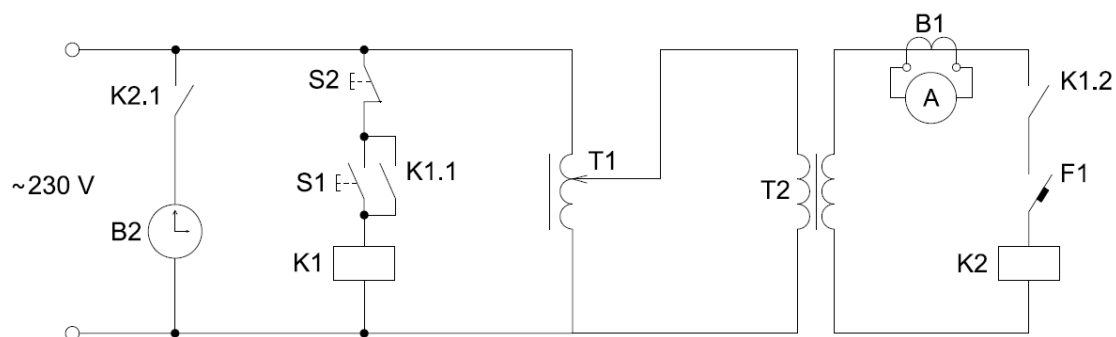
Et katseid paremini visuaalselt analüüsida, jäädvustati need suure kaadrisagedus kaamera MotionBlitz Cube 4-ga (joonis 3.3).



Joonis 3.3. Kaamera MotionBlitz Cube 4. [20]

Katse lülitusskeemi on kujutatud joonisel 3.4. Katse käigus lülitati käivitusnuppu *-S1*, mille vajutamisel kontaktor *K1* rakendus ning kontaktid *K1.1* ja *K1.2* sulgusid, pingestades voolurelee *-B1* kontaktori *-K2*. Selle tulemusena rakendus ka stopperi kontakt *-K2.1*. Surunupp *-S2* on seiskamislüliti, mille lülitusel *K1* kontaktid *K1.1* ja *K1.2* avanevad katkestades ahela ja stopper *-B2* seiskub. Käivitusnuppu vajutades ning kaitselüliti *-F1* sisse lülitamisel tekkis vooluring

katseendi ja kaitselüliti vahel. Kaitselüliti testimiseks keerati autotrafo -T1 maksimaalkoormusele ning kaitselüliti rakendus.

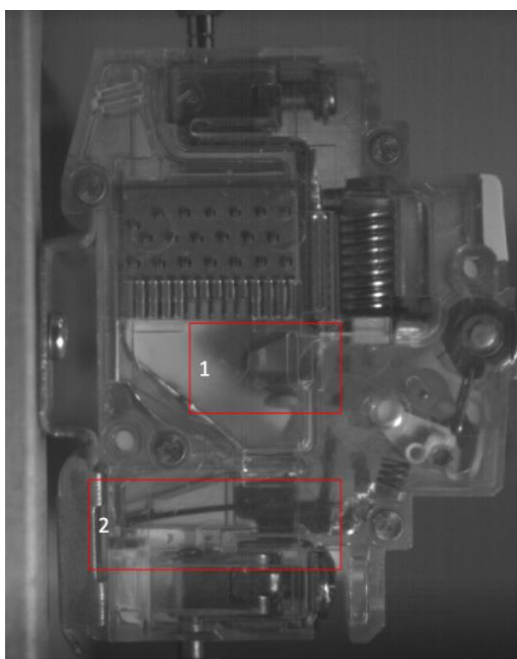


Joonis 3.4. Katse lülitusskeem.

Ampermeetri -A näitu ei fikseeritud. Katse ajal oli labori ruumitemperatuuriks 21°C. Katset korraldati kümme korda.

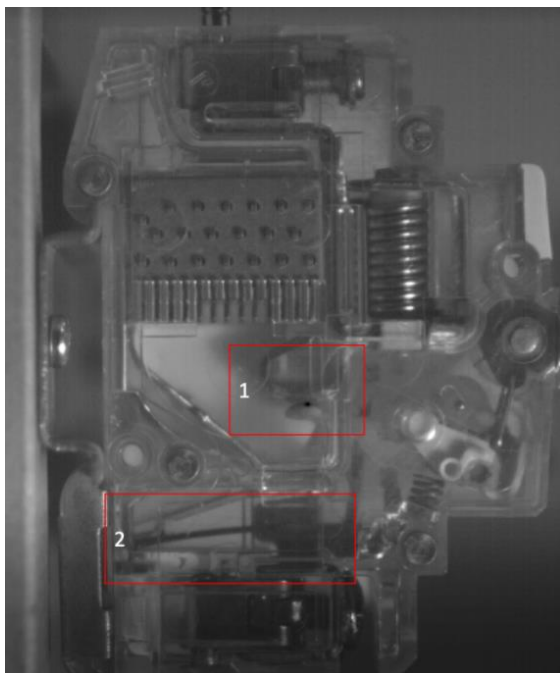
3.1.2. Katse tulemused ja analüüs

Joonisel 3.5 on kaitselüliti sisselülitatuna, kuid koormuseta olekus. Jooniselt on näha, et lülitismehhanism on fikseerinud liikuvat kontakti (joonis 4.4 punkt 1) ning termovabasti on oma normaalolekus (joonis 3.5 punkt 2).



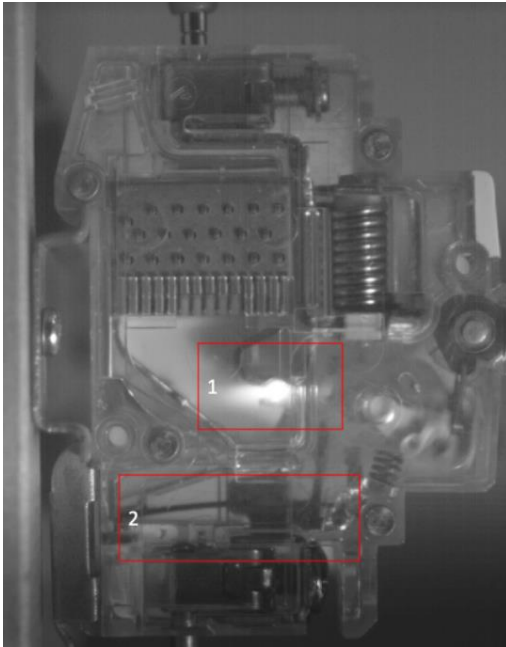
Joonis 3.5. Kaitselüliti sisselülitatuna. 1 – suletud liikuvkontakt; 2 – termovabasti.

Vaid paar sekundit pärast koormuse rakendamist on näha, kuidas kaitselüliti liikuva ja liikumatu kontakti vahele hakkab tekkima süttimine, tekitades sellega suitsukogumiku kontaktide vahele (joonis 3.6 punkt 1). Lisaks on näha, kuidas termovabasti bimetall on suure koormusest tingitud kuumuse tõttu hakanud vajuma allapoole (joonis 4.5 punkt 2).



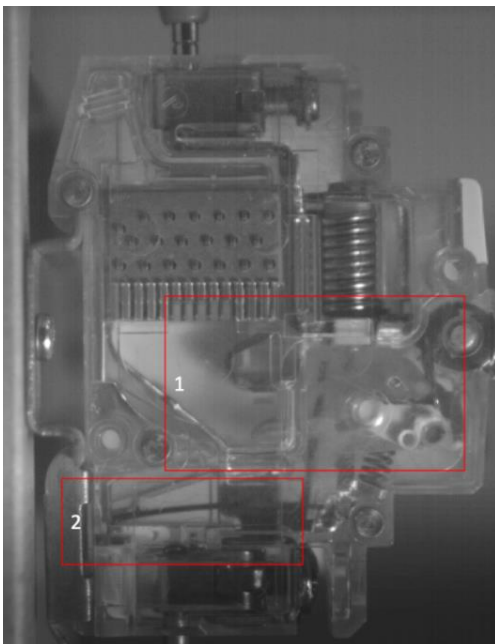
Joonis 3.6. Kaitselüliti vahetult enne elektrikaare tekkimist. 1 – kontaktide vahelise süttimise algus; 2 – termovabasti.

Järgmises kaadris (joonis 3.7) on näha, kuidas termovabasti rakendub, vabastades sellega lülitusmehhanismi, mille tulemusel lülitushoob liigub väljalülitusasendisse ning samaaegselt tekib kontaktide vahele elektrikaar, mis kustub üsna kiiresti. Videolt vaadates võib järeldada, et elektrikaar kustub enne kaarekustutusvõrre jõudmist.



Joonis 3.7. Kaitselüliti rakendumine ja elektrikaar. 1 – elektrikaar; 2 – termovabasti.

Kaitselüliti väljalülitamise hetkel oli näha, et lülitusmehhanismi liigendid liiguvad veel peale vabastamist inertsist hetkeks veidi üles ning langedes seejärel alla, fikseerides kaitselüliti väljalülitatud asendisse (joonis 3.8).

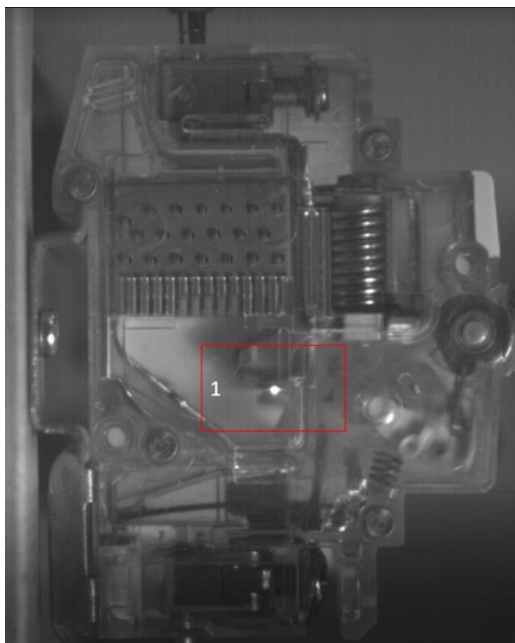


Joonis 3.8. Kaitselüliti väljalülitatud asend. 1 – lülitusmehhanism ja liikuv kontakt; 2 – termovabasti.

Eelnevalt kirjeldatud videokaader, kus oli näha lülitusmehhanismi liikumist inertsist, hetk peale kaitselüliti rakendumist, viitab tekkinud elektrodünaamilisele jõule suure koormusvoolu tõttu, mis ületas kordades kaitseaparaadi nimivoolu.

Kuumenemise protsessi mõjud olid selgesti tuntavad juba peale esimest katset. Korpus oli soojenenud tunduvalt, mis viitab soojuse akumulereerumisele kaitselüliti komponentides. Selline soojus kandus edasi ka ühendatud kaablitele, mis nagu eelnevates peatükkides mainitud, vähendab kaablite isolatsiooni eluiga. Kuumenemise tõttu soojenes iga katsega ka termovabasti bimetall ning kuna katsete vahele jäeti liiga vähe jahtumisaega, oli kontaktide lahutumine ka lõpukatsetel kiirem.

Olgugi, et koormusvool ületas tunduvalt kaitselüliti nimivoolu, oli elektrikaar kontaktide vabastumisel üsna väike ja elektrikaar kustus enne kaarekustutusvõresse jõudmist. Mida katsed edasi, seda väiksemaks muutus elektrikaar, viimasel katsel tekkinud elektrikaar oli võrreldes esimesel katsel tekkinud kaarega palju väiksem (joonis 3.9). Kuid elektriohutuse ja kaitseaparaadi kasutuse kohalt on see pigem hea nähtus, kuna kaitseaparaat rakendus nii nagu pidi igal katsel, tehes minimaalset kahju elektriahela juhistikule ning kaitselüliti konstruktsioonile.



Joonis 3.9. Viimasel katsel tekkinud elektrikaar.

Katsete lõppedes tehti visuaalne kontroll kaitselüliti konstruktsioonile. Lülitusmehhanism koos liigenditega olid töokorras, kaitselüliti oli võimalik lülitada nagu enne katseid. Kontaktid rakendumisel kokku ei keevitunud ning termovabasti taastas oma rakendumiseelse kuju ning kaitselüliti jäi töökõlblikuks ka peale katseid.

Katsete analüüsi tulemusena võib väita, et kommutatsiooniprotsess kaitselülites toimus üsna sarnaselt kirjanduses kirjeldatule.

3.2. Kommutatsiooniprotsess juhtimisaparaatides

3.2.1. Katsetetoodika

Juhtimisaparaatide kommutatsiooniprotsessi analüüsiks sooritati katsed Tallinnas Eesti Elektritööde Ettevõtjate liidu liikmesettevõtte Eletal Service OÜ töökoja katsestendil. Katselisteks lülitusaparaatideks valiti 12 voldise alalisvoolumähisega relee, millel väljundkontaktidega saab juhtida kuni 250 voldist vahelduvpinget (joonis 3.10) ning teiseks lülitusaparaadiks valiti 230 voldise vahelduvvoolumähisega kolmefaasiline kontaktor kasutuskategooriaga AC3 (joonis 3.11).



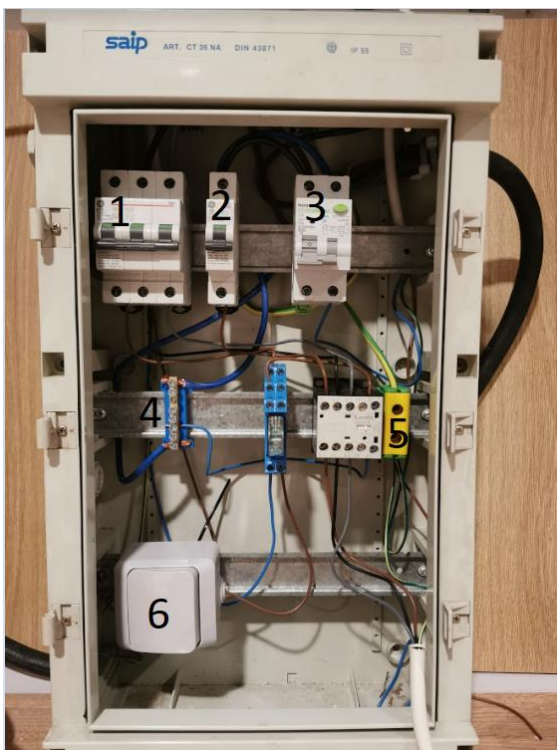
Joonis 3.10. Relee Finder koos alusega.



Joonis 3.11. Kontaktor Lovato BG09.

Katsestendi (joonis 3.12) komponentide hulka kuulsid veel:

1. General Electric G63B16 B16 3 faasiline kaitselüliti
2. General Electric G6B6 B6 1 faasiline kaitselüliti
3. Noark Ex9BL-N B10 kombikaitselüliti
4. Neutraalilatt
5. Maandusklemm
6. IP44 lihtlüliti



Joonis 3.12. Lülitusaparaatide uurimise katsestend

Lisaks kuulus katsestendi juurde veel 12 voldi alalisvoolu toiteallikas relee juhtimiseks (joonis 3.13), kuid see ei mahtunud elektrikilpi.



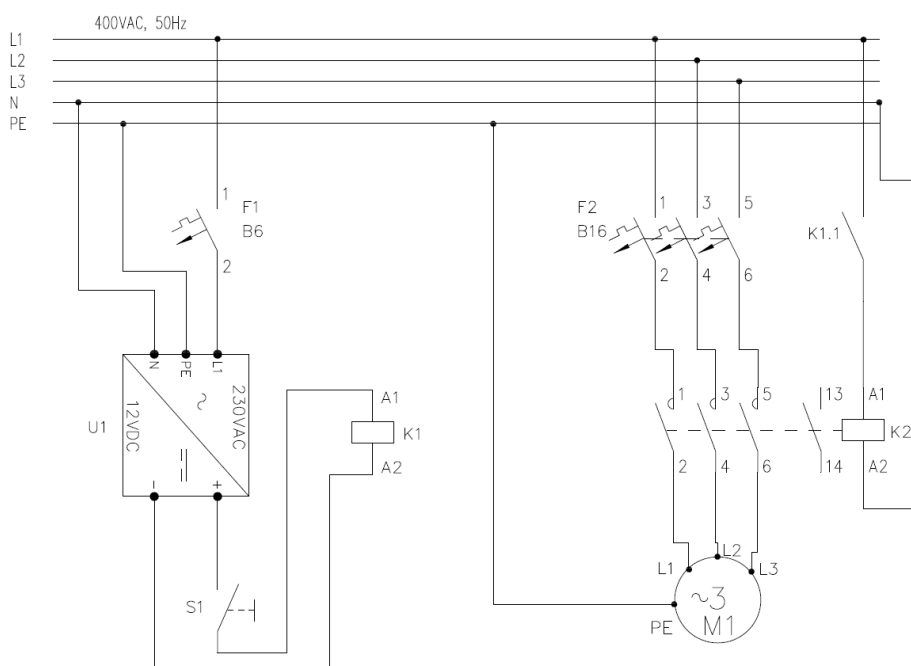
Joonis 3.13. Alalisvoolu toiteallikas.

Katse eesmärgiks oli analüüsida erinevate koormuste lülitamisel tekkinud kommutatsiooni- protsesse lülitusseadmetes. Koormusteks valiti ühefaasiline 1,5 kW boiler (joonis 3.14) ning 0,37 kW kolmefaasiline elektrimootor, mis on mõlemad vastavuses lülitusseadmete nimiomadustega (joonis 3.15). Mõlema koormuse lülitusi korrati 10 korda.



Joonis 3.14. Elektriboileri nimiaandmed.

Elektrimootori lülituskatse relee ja kontaktori juhtimine oli identne boileri lülituskatse omale. Antud katsel oli kontaktori põhiklemmidele tekitatud ühendus B16 kolmefaasilise kaitsmega - *F2* ja elektrimootori -*M1*-ga. Maandusklemm *PE* oli ühendatud otse katsestendi maandusklemmidele. Lülitite -*S1* lülitus rakendas relee ja kontaktori ning elektrimootor -*M1* käivitus. Antud katset on kujutatud joonisel 3.17.



Joonis 3.17. Elektrimootori käivitamise lülitusskeem.

Katsete analüüsiks jäädvustati kõik katsed iPhone 12 Pro Max nutitelefoni kaameraga (joonis 3.18).

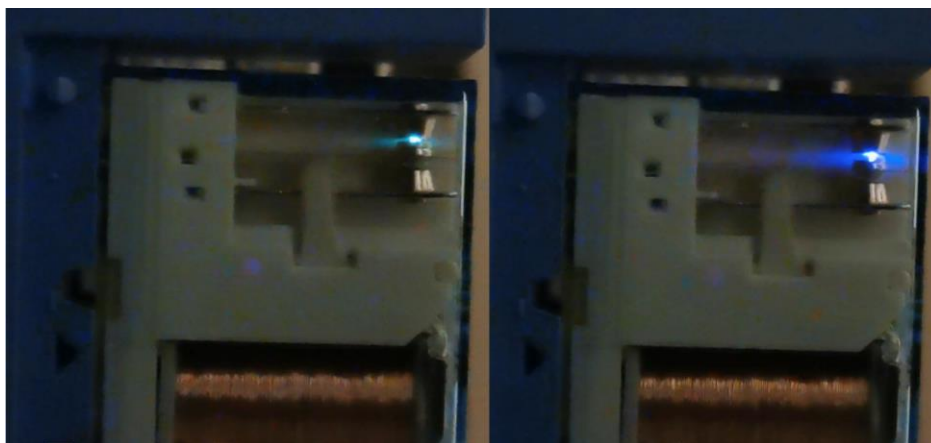


Joonis 3.18. iPhone 12 Pro Max.

Kõikide katsete järelvaatajaks oli Eletal Service OÜ juhatuse liige Toomas Väljaots, kes omab magistrikraadi energeetikas ning B-klassi pädevustunnistust.

3.2.2. Katse tulemused ja analüüs

Esimese katse käigus tekitati lülitus läbi relee ja kontaktori, et käivitada boilerit. Lülituse hetkel on näha, et elektrikaar tekib nii relee (joonis 3.19) kui ka kontaktori juhtimisklemmide vahel (joonis 3.20). Seda võis ka mõneti oodata, sest releeeklemmide jaoks on kontaktori mähis arvestatavaks tarbijaks ning boiler oli reguleeritud nii, et vooluringi tekkimisel ta kohe käivituks, tekitades samuti koormusliku elektrikaare. Relee ja kontaktori ees olevad kaitselülidid käivitamise hetkel ei rakendunud.



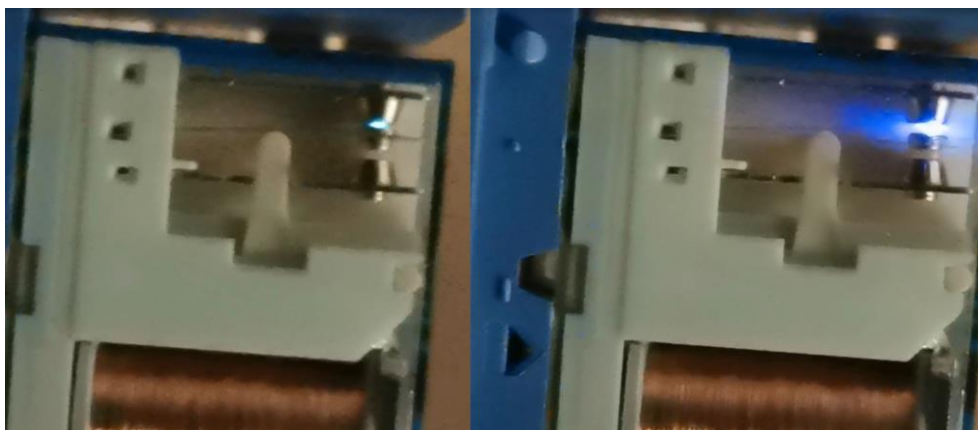
Joonis 3.19. Relee kontaktide sisselülitus (vasakul) ning väljalülitus (paremal).

Väljalülitusel on sarnaselt sisselülitamiselegi näha elektrikaart, kuid nagu jooniselt näha, on elektrikaar väljalülitamisel veel suurem, mis sarnaneb suuresti kaitselüliti kommutatsioonile.



Joonis 3.20. Kontaktori kontakide sisselülitus (vasakul) ja väljalülitus (paremal).

Teise katsena lülitati kolmefaasilist elektrimootorit. Sisselülitusel on näha, et relee kontaktide vahele tekkinud elektrikaar (joonis 3.21) on sarnane esimese katse lülitusele, sest kuna relee lülitas endiselt ainult kontaktori mähist, siis tema jaoks koormuslikult midagi ei muutunud. Küll aga on muutus kontaktori sisselülitamisel (joonis 3.22). Kui võrrelda seda esimese katse kontaktori sisselülitumisega, siis on näha, et mootori sisselülitamise elektrikaar on tunduvalt väiksem kui boileri sisselülitamisel. Olgugi, et elektrimootor on induktiivne tarbija, mis teoreetiliselt vajab suuremat käivitusvoolu, on võimsuste erinevused (mootoril 0,35 kW ja boileril 1,5 kW) liialt suured.



Joonis 4.21. Relee kontaktide sisselülitus (vasakul) ja väljalülitus (paremal)

Ka väljalülitusel relee elektrikaar ei muutu esimese katse omast. Kontaktori väljalülitusel on näha, et väljalülituse elektrikaar ei ole mitte ainult intensiivsem kui sisselülitusel, kuid nüüd on tekkinud elektrikaar ka igas faasis eraldi, kuna lülitatav tarbija on kolmefaasiline. Kuid üldintensiivsus on ikkagi madalam (elektrikaar ei ole nii erk) kui boilerilülitusel.



Joonis 3.22. Kontaktori kontaktide sisselülitus (vasakul) ja väljalülitus (paremal).

Kuumenemise protsessi mõjusid katsete vältel ja lõppedes relee ning kontaktori korpusel ei täheldatud. See on suuresti tingitud sellest, et ümbritseva keskkonna temperatuur oli 15°C, tarbija tööprotsess kestis umbes 10 sekundit, enne kui toimus väljalülitus ning lisaks ei tekitatud sellist ülekoormust nagu seda tekitab kaitselülitite katsel, vaid lülitus- ja kaitseaparatuur oli valitud selliselt, et ülekoormust seadmetele ei tekiks.

Elektrikaart oli näha mõlema tarbija katse sisse- ja väljalülitusel. Elektrihaar oli silmanähtavalt intensiivsem suurema tarbija väljalülitusel, mida võis ka enne lülitust oodata, sest teooria kohaselt on kontaktide lahutamine raskeimaks kommutatsiooniprotsessiks. Katsete lõppedes elektrikaare mõjusid lülitusaparaatidel ei täheldatud, kontaktid kinni ei keevitunud ning aparatuur jäi töökõlblikuks ka peale katseid.

Elektromagnetilisi jõududest tingitud deformatsioone lülitusaparaatidel peale katsete sooritamisi ei nähtud. Kõik lülitust tekitavad mehhanismid olid töökorras.

Katsete analüüsi tulemusena võib väita, et kommutatsiooniprotsess toimus lülitusaparaatides teooria kohaselt.

KOKKUVÕTE

Käesolev bakalaureusetöö annab hea ülevaate kommutatsiooniprotsessist elektrilistes kaitse- ja juhtimisaparaatides. Töö eesmärgiks oli näidata katselisel meetodil aparaatide sees toimuvaid protsesse, analüüsides neid teoreetiliste kommutatsiooni põhimõtetega ning oleks õppematerjaliks inseneeria-ala üliõpilastele, kellel on elektrotehnika üldainena.

Töö esimeses sisupeatükis anti ülevaade mini-kaitselülititest. Esmalt toodi välja põhjused, miks on mindud sulavkaitsmetelt üle kaitselülititele ning milliste rikete ja ohtude vältimiseks neid kasutatakse. Kaitselülitite ehituse ja tööpõhimõtte alapeatükis anti põhjalik ülevaade tänapäeval kasutatavatest mini-kaitselüliti ehitusest – kuidas nad töötavad ja millistest osadest nad koosnevad. Lisaks toodi välja erinevad kaitselülitite karakteristikud ja tunnusjooned ning millist rolli nad omavad tavakäitamisel ja avariiolukorras.

Teises peatükis kirjeldati lähemalt juhtimisaparaate. Kõigepealt vaadeldi elektromagnetiliste releede ehitust ja tööpõhimõtet ning miks neid on hea distantljuhtimisel kasutada. Seejärel tutvuti erinevate elektromagnetiliste releede lülitusvõimaluste ning erinevate mähise tüüpidega, kuidas lugeda releedelt nimivandmeid ning toodi välja põhimõttelisi lülitusskeeme, kuidas releesid rakendada. Teise peatüki viimases alapeatükis kirjeldati kontaktoreid, millised on nende ehituslikud omadused, kuidas ja millal saab neid rakendada, kuidas saada aru millise koormuse lülitamiseks ühe või teie kasutuskategooriaga kontaktor sobib ning toodi välja põhiline erinevus kontaktorite ja releede vahel.

Kolmas sisupeatükk kirjeldas ja analüüsis täpselt kommutatsiooniprotsessi. Esmalt uuriti kaitselülitite kommutatsiooniprotsessi, selleks viidi Eesti Maaülikooli Tehnikamaja elektrimasinate laboris läbi katsed, kus koostati katsestend millega rakendati suurt ülekoormust Hager B16 kaitselülitile. Katset korraldati kümme korda, mis kõik jäädvustati visuaalselt kaameraga. Kaamera piltidelt on selgelt näha kommutatsiooniprotsessi kulgu. Ülekoormusel rakendub kaitselüliti termovabasti, mis lülitab kaitselüliti välja ning kõrval nähtustena tekib

kontaktide vahele elektrikaar ning pärast väljalülitumist on näha väikeseid elektrodünaamilise jõu nähtusi kaitselüliti lülitusmehhanismi. Lisaks kahele eelnevale nähtusele oli selgelt tunda kaitseaparaadi kuumenemine, mis on samuti kommutatsiooniprotsessi füüsiliseks nähtuseks.

Teine praktiline katse uuris lähemalt relee ja kontaktori kommutatsiooniprotsessi. Selle uurimiseks viidi läbi Tallinnas Eletal Service OÜ töökoja katsestendil lülituskatsed, mis sarnaselt esimesele katsele jäädvustati visuaalselt kaameraga. Esimese katsena sooritati lülituskatse, kus alalispinge mähisega relee juhtis vahelduvvoolu mähisega kontaktorit, mis lülitas elektriboilerit ning teise katsena lülitati elektrimootorit. Kaamera piltidelt on näha kuidas kontaktide lahutamisel tekkinud elektrikaar on tunduvalt intensiivsem kui sisselülitusel, mis viitab teoreetilisele printsiibile, et kontaktide lahutus on kommutatsiooniprotsessi raskeim faas. Lisaks on näha kuidas suurema nimivõimsusega tarbijal (antud katse puhul elektriboiler) on väljalülitumisel kontaktide vaheline elektrikaar samuti intensiivsem. Kontaktide lahutamisel vabaneb seadmetesse salvestunud energia, mis võib rikkuda elektroonikakomponentidel põhinevaid lülitusseadmeid (kontrollerid, muundurid jmt). Füüsilistest kõrval nähtustest suudeti eristada elektrodünaamilisi nähtusi ning ka soojenemist täheldati juhtimisaparaatidel minimaalselt, kuna katse kestis lühiajaliselt ning valitud koormused ei tekitanud aparaatides ülekoormust.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. EVS-HD 60364-4-41:2017. Madalpingelised elektripaigaldised. Osa 4-41: Kaitseviisid. Kaitse elektrilöögi eest. [veebileht]
<https://www.evs.ee/et/evs-hd-60364-4-41-2017> (9.05.2021).
2. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. EVS-HD 60364-5-51:2009+A11+A12. Ehitiste elektripaigaldised. Osa 5-51: Elektriseadmete valik ja paigaldamine. [veebileht]
<https://www.evs.ee/et/evs-hd-60364-5-51-2009%2Ba11%2Ba12> (9.05.2021).
3. **Teemets, R.** (1994). Kaitselülitid. Tallinn: Trükikoda Printall RdE.
4. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. EVS-EN 60898-1:2019. Elektritarvikud. Liigvoolukaitselülitid majapidamis- ja muudele taoliste paigaldistele. Osa 1:Vahelduvvoolukaitselülitid. [veebileht].
<https://www.evs.ee/et/evs-en-60898-1-2019> (22.05.2021).
5. **Teemets, R.** TTÜ loengukonspekt [veebileht].
http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/5.5.1..._5.5.5_Kaitselylitid._Liinikaitselylitid._Konspekt2010.pdf (9.05.2021)
6. ABB. Comparison of tripping characteristics for miniature circuit-breakers. [veebileht].
https://library.e.abb.com/public/114371fcc8e0456096db42d614bead67/2CDC400002D0201_v1ew.pdf (9.05.2021).
7. OMRON . What is and electrical relay? [veebileht].
<https://components.omron.com/relay-basics/basic> (12.05.2021)
8. **Popov, V. ja Nikolajev, S.** (1970). Elektrotehnika. Kirjastus „Valgus”.
9. **Gruevich, V.** Electric Relays Principles and Applications. [veebileht]
https://books.google.ee/books?id=mW3LBQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=relay&hl=et&sa=X&ved=2ahUKEwj5_qyc6aPwAhUxxosKHc9wDxAQ6AEwBHoECAQQAg#v=onepage&q&f=false (12.05.2021).
10. Glolab Corporation. [veebileht]. <http://www.glolab.com/relays/relays.html> (12.05.2021).

11. Põltsamaa Ametikool. Elektrotehnika alused. [veebileht].
https://www.hariduskeskus.ee/opiobjektid/elektrotehnika_alused/relee.html (12.05.2021).
12. ABB, Low Voltage Products. CR-P interface relays. [veebileht].
<https://new.abb.com/low-voltage/products/electronicrelays/interface-relays-and-optocouplers/cr-p-range> (12.05.2021)
13. ABB CR-P024DC2 Relee joonis. [veebileht].
https://img.alicdn.com/imgextra/i4/904798973/O1CN01HZkuen2G9gSSMCB0h_!!904798973.png?fbclid=IwAR3rilYk75TK3BQRmbBktCVL0vw8qdhe7mT8I5YtUmogfiLVrUoV0Z7On1M (12.05.2021).
14. ABB Product Details. Detailed information for: CR-P024DC2 [veebileht].
<https://new.abb.com/products/1SVR405601R1000/cr-p024dc2-pluggable-interface-relay-2c-o-a1-a2-24vdc-250v-8a> (22.05.2019).
15. International Electrotechnical Commission. IEC 60947-5-1:2016. Corrigendum 2 - Low-voltage switchgear and controlgear - Part 5-1: Control circuit devices and switching elements - Electromechanical control circuit devices. [veebileht].
<https://webstore.iec.ch/publication/66827> (21.05.2021).
16. Electrical Technology. [veebileht].
<https://www.electricaltechnology.org/2020/06/electrical-contactor.html> (12.05.2021)
17. Kontaktor. TTÜ loengumaeterjal. [veebileht].
http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/5_Kontaktor.pdf (22.05.2021).
18. Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. EVS-EN IEC 60947-4-1:2019. Madalpingelised lülitusaparaadid. Osa 4-1: Kontaktorid ja mootorikäivitid. Elektromehaanilised kontaktorid ja mootorikäivitid. [veebileht].
<https://www.evs.ee/et/evs-en-iec-60947-4-1-2019> (22.05.2021).
19. ABB. Low Voltage Products. AF 3-Pole contactors. [veebileht]
<https://new.abb.com/low-voltage/products/motor-protection/3-pole-contactors-and-overload-relays-for-motor-starting/afcontactors> (21.05.2021).
20. TTÜ loengukonspekt [veebileht].
http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/1_1_Kommutatsiooniprotsess.pdf (26.05.2021)

LIHTLITSENTS

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina: Mihkel Leht,
sünniaeg: 27.09.1991

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
Kommutatsiooniprotsessi analüüs,
mille juhendajad on Erkki Jõgi ja Siim Muiste,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor *(allkirjastatud digitaalselt)*
(allkiri)

Tartu, 28.05.2021

Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Erkki Jõgi
(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäev)

Siim Muiste
(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäev)